

四脚動物の高速口コモーションに内在する脚間協調メカニズムに関する研究

著者	福原 洸
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	87
号	1
ページ	6-9
発行年	2018-08
URL	http://hdl.handle.net/10097/00123422

博士学位論文要約（平成30年3月）

四脚動物の高速ロコモーションに内在する 脚間協調メカニズムに関する研究

福原 洸

指導教員：石黒 章夫

Interlimb Coordination Mechanism Underlying High-Speed Quadrupedal Locomotion

Akira FUKUHARA

Supervisor: Akio ISHIGURO

Quadrupeds exhibit speed-dependent gait transition to achieve low cost of transport over a wide range of speeds. Even decelerate cats could exhibit spontaneous gait transition, suggesting that these adaptive gait patterns are generated by decentralized control systems (i.e. central pattern generator and reflexes). Previous studies have addressed this issue; however, the essential control mechanism that enables spontaneous transition from low- to high-speed gait is still unclear. To address this issue, this thesis proposed the interlimb coordination mechanism by focusing on two fundamental roles of limbs: body support and propulsion. The proposed model reproduced these behaviors during the galloping gait, suggesting that local sensory feedback based on the horizontal component is essential for the interlimb coordination mechanism underlying high-speed quadrupedal locomotion.

1. はじめに

四脚動物は移動速度や種に応じて足並みを適応的に変化させることが知られている^{1,2)}。この典型的な足並みは、脚の間の協調運動（脚間協調運動）によって実現されており、歩容（gait）と呼ばれ分類されている。例えばイヌは、低速では lateral-sequence walk (LS walk) と呼ばれる歩容を発現し、同側の脚を後脚から前脚の順番に動かす。速度が上がると、イヌは対角の脚同士を揃えて動かす trot と呼ばれる歩容を示す。更に速度をあげると、ウマの走法に代表されるように、左右の脚をスキップのように協調させる走法を示す (horse-like gallop)。そして、全力疾走する際は、脚だけでなく胴体や頸部の屈曲運動を積極的に活用し、チータに代表される走法を示す (cheetah-like gallop)³⁾。このように移動速度に応じて適応的に歩容を変化させることで、四脚動物は幅広い移動速度帯で効率的な移動を実現している¹⁾。この適応的な振る舞いの発現機序を理解することができれば、脚式ロボットの移動能力を飛躍的拡張化することが期待できる。あたかも自動車の変速機を持つような適応的な振る舞いはどのように実現されているのか？

上記の疑問を解決する鍵となる知見が、徐脳ネコを用いた神経生理学分野の実験によって示されている⁴⁾。徐脳ネコは、大脳を外科的に切除されているに

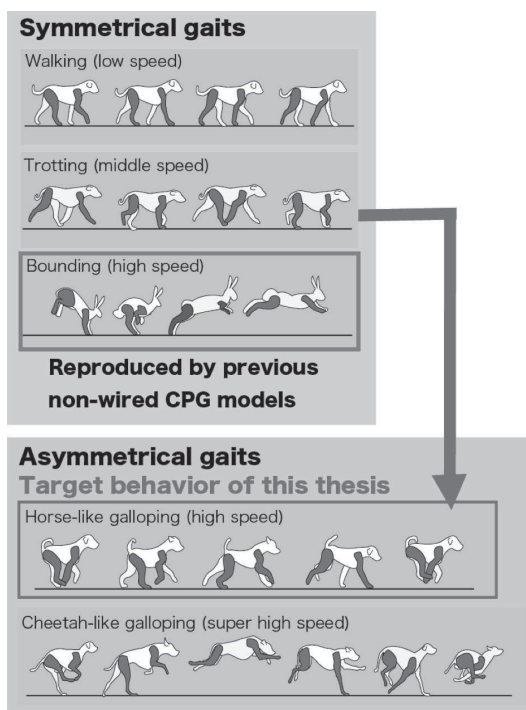


図1 四脚動物の示す移動速度に応じた歩容

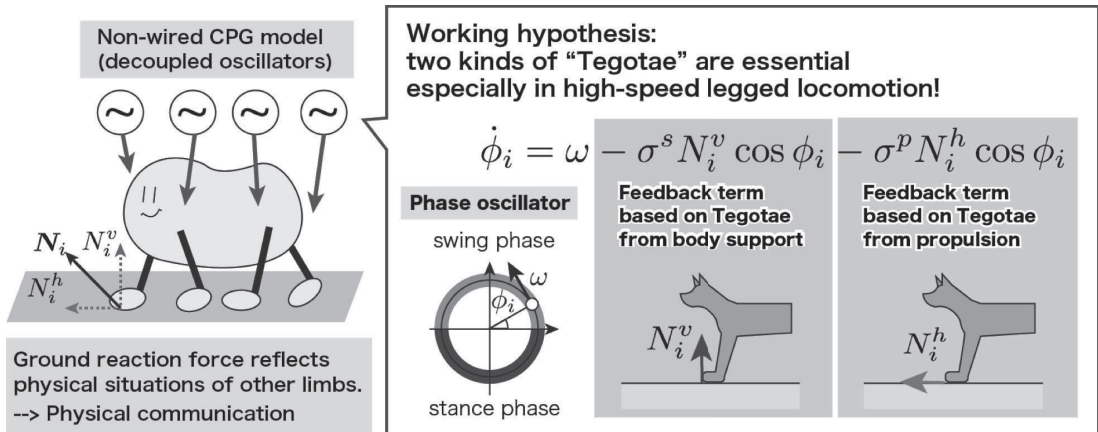


図2 提案モデルの概要

も関わらず、中脳への電氣的な刺激やトレッドミルの回転速度に応じて適応的に歩容を変化させる。このことから、四脚動物の適応的な脚間協調運動は、大脳によって中央集権的に制御されているのではなく、脊髄内に存在する神経回路網 central pattern generator (CPG) や反射のメカニズムによって自律分散的に制御されていることが示唆されている⁸⁻¹⁰⁾。

こうした生物学的な知見に基づくこれまで様々な CPG モデルが提案されてきた¹¹⁻¹⁶⁾。その多くは、特定の脚の協調関係(例えば、右前脚を持ち上げたら左前脚は下ろすなど)を、脚間の神経接続を介した相互作用によって実現するといったアプローチを採っている。これにより特定の歩容を生成することに成功しているが¹⁷⁻²¹⁾、脚間協調運動の多様性は生物に未だ及ばない。

神経を介した相互作用に基づいた CPG モデルが提案されている一方で、身体を介した力学的相互作用に着目した CPG モデルも提案されている²²⁻²⁶⁾。「身体を支えている荷重を強く感じている脚はそのまま支持し続ける」という単純なルールにも関わらず、ロボットの身体的特徴(重心の偏りなど)や移動速度に応じた脚間協調運動が自己組織的に生成されることが報告されている。このことから、適応的な脚間協調運動の生成メカニズムにおける身体と環境の力学的相互作用の重要性が示された²⁶⁾。しかしながら、再現された高速歩容は左右の脚を揃えた bound と呼ばれる歩容であり、ウサギなどごく一部の小動物が示す走法であった。一方、走り得意とするウマやイヌは左右を非対称に協調させる歩容を示す。著者らは、非対称な協調パターンを示す gallop への自発的な歩容遷移メカニズムの理解なくしては、四脚動物が示す適応的な脚間協調運動に通底する制御原理の抽出

は成し得ないと考えた。

以上のことから、本学位論文では以下2点の問いに答えるものである(図1)。

- Gallop への自発的な歩容遷移を可能とするシンプルな脚間協調制御則とは何か?
- Gallop と bound における制御メカニズムの違いとは何か?

上記の問いに対して、本研究では力学的相互作用に着目することで、gallop への自発的な歩容遷移を可能とする脚間協調制御則のミニマルモデルの構築を試みた。

2. 身体の支持と推進に着目した脚間協調制御則の構築

Gallop への自発的な歩容遷移を可能とする制御の本質とは何なのか? 本研究では「そもそも脚の役割とは何なのか?」という基本的な問いに立ち戻って制御則の構築を始めた。脚式ロコモーションにおいて脚は、身体の重量を支えるだけでなく、身体を前方へ推進させる必要がある。この「身体支持」と「身体推進」の2つの要請を同時に満足させるために、四脚動物は脚の協調パターンを巧みに変化させていると考えられる。しかるにこれまでの脚間協調モデルでは、支持の要素を考慮している一方で、推進の要素について十分に考察されていない。そこで本研究では、身体の支持と推進の両方を考慮した脚間協調制御則を提案する。具体的には、各脚の周期運動を位相振動子で表現し、各脚の位相 ϕ_i の時間発展式は次のように記述される:

$$\dot{\phi}_i = \omega - \sigma^s N_i^v \cos \phi_i - \sigma^p N_i^h \cos \phi_i. \quad (2.1)$$

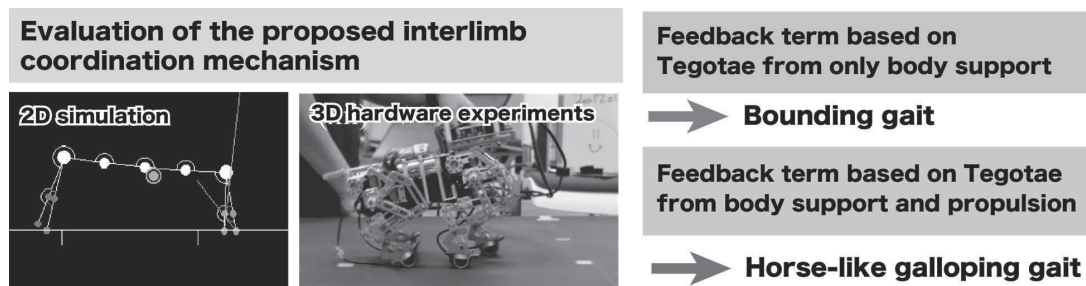


図3 Horse-like gallop と bound 歩容の自発的歩容遷移の実現

ここで、 ω は脚の運動周期を決める固有角速度、 σ^s と σ^p は身体の支持と推進の役割に基づく局所センサフィードバックに関する重み係数、 N_i^p と N_i^h は各脚の床反力の垂直成分と水平成分(信仰方向を正とする)である(図2)。力学的相互作用に基づく本モデルでは、式(2.1)の第2項と第3項による局所センサフィードバックによって脚の位相を調整することで、位相速度の応じた適応的な脚間協調運動を自己組織的に生成する。先行研究との関係として、 $\sigma^p = 0$ の場合は、身体支持のみを考慮した従来モデルと本質的に一致することに留意されたい。

3. シミュレーションとロボット実機による検証実験

提案制御則の有用性を検証するために、シミュレーションとロボット実機の両方から歩行・走行実験を行なった。実験条件として、 ω のみを低速・中速・高速と段階的に変化させ、歩容の変化を確認した。その他の制御パラメータは実験中の変化しないものとする。

シミュレーションとロボット実機の両方において、 $\sigma^s > 0, \sigma^p > 0$ の時に gallop へ自発的な歩容遷移が確認された。また、 $\sigma^s > 0, \sigma^p = 0$ の条件では、bound 歩容への遷移が確認された(図3)。以上のことから、gallop への自発的な歩容遷移を実現には

身体的支持のみならず推進の基づいた局所センサフィードバックが有用であることが示された。力学的相互作用のみに基づいた脚間協調制御則によって、horse-like gallop と bound 歩容を発現させたのは世界で初めてに研究事例である。

次に、異なる高速歩容を再現可能な制御則から gallop と bound 間の制御メカニズムの違いを考察した。Bound へ自発的に歩容遷移する条件では、従来研究によって提案されている身体支持に基づくフィードバック則が「着地後の脚の蹴り出し

を強める」ように位相を修正していた。この蹴り出しの強化と両足による踏切により、重力によって落下する身体を素早く上昇に転じることが可能となる。こうした運動は体重の小さな小動物の走行に適している^{27,28)}。

一方、gallop へ自発的に遷移する条件では、身体推進に基づくフィードバック則が「着地後の蹴り出しを抑える」ように機能していることが実験から明らかになった。Horse-like gallop による走行では、後脚から始まる全ての脚の支持によって、下降していた重心を上昇に転じることができる。自脚の出力をセーブし、他脚との協調によって運動を実現する制御は、体重が比較的大きなウマなどの走行に適している^{28,29)}。

4. まとめと今後の予定

以上要するに本論文は、gallop への自発的な歩容遷移の再現を通して、四脚動物が示す高速ロコモーションに内在する脚間協調運動の制御メカニズムを力学的相互作用の観点から明らかにしたものである。これらの知見は、環境との力学的な相互作用を積極的に活用可能なロボットの制御原理の構築において有用である。

四脚動物の高速歩容には、今回再現された horse-like gallop よりも更に高速な cheetah-like gallop が存在する。Cheetah-like gallop では、脚だけでなく、身体が有する運動自由度を総動員することで、高速な移動を実現している^{28,30)}。今後は、チータやイヌの走行に焦点を当てることで、全身の備わる運動自由度を統御可能な自律分散制御則の抽出に取り組む予定である。

文献

- 1) D. F. Hoyt and C. R. Taylor, Nature, **292**, (1981), 239-240.
- 2) R. M. Alexander, Int. J. Robotics Res., **3**(2) (1984)

- 49-59.
- 3) L. Maes, M. Herbin, R. Hackert, V. L. Bels, and A. Abourachid, *J. Exp. Biol.*, **211** (2007) 138-149.
 - 4) T. A. McMahon, Princeton University Press (1984)
 - 5) T. G. Brown, *Proc. Roy. Soc. London Ser. B* (1911) 308-319.
 - 6) M. L. Shik, F. V. Severin, and G. N. Orlovsky, *Biophysics*, **11**(4) (1966) 756-765.
 - 7) M. L. Shik and G. N. Orlovsky, *Physiol. Rev.*, **56**(3) (1976) 564-501.
 - 8) S. Grillner, *Physiol. Rev.* **55**(2) (1975) 247-304.
 - 9) H. Yuasa and M. Ito, *Bio. Cynern.*, **63**(3) (1990), 177-184.
 - 10) S. Ito, H. Yuasa, Z. Luo, M. Ito, and D. Yamagihara, in *Proc. of SMC1997*, 175-280.
 - 11) M. Golubitsky, I. Stewart, P. L. Buono, and J. J. Collins, *Physica D*, **115** (1998) 56-72.
 - 12) J. J. Collins and S. A. Richmond, *Bio. Cynern.*, **71**(5) (1994) 375-385.
 - 13) P. L. Buono and M. Golubitsky, *J. Math. Biol.*, **42**(4) (2001) 291-326.
 - 14) J. Buchli and A. J. Ijspeert, in *Proc. of Bio-ADIT2004*, 333-349.
 - 15) K. Matsuoka, *Bio. Ctnern.*, **52**(6), (1985) 367-376.
 - 16) S. M. Danner, S. D. Wilshin, N. A. Shevtsova, and I. A. Rybak, *J. Physiol.*, **594**(23) (2016), 6947-6967.
 - 17) S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, N. Tomita, T. Funato, T. Yamashita, K. Senda, and K. Tsuchiya, *J. Royal Soc. Interface* **10**(81) (2010) 20120908.
 - 18) A. Billard and A. J. Ijspeert, in *Proc. of IEEE-INND-ENNS2000*, 637-641.
 - 19) G. Brabilla, J. Buchi, and A. J. Ijspeert, in *Proc. of SAB2006*, 138-149.
 - 20) Y. Fukuoka, Y. Habu, and T. Fukui, *Sci. Rep.*, **5**, (2015) doi:10.1038/srep08169.
 - 21) H. Kimura, S. Akiyama, and K. Sakurama, *Auton. Robots*, **7** (1999) 247-258.
 - 22) C. Maufroy, H. Kimura, and K. Takase, *Auton. Robots*, **28** (2010), 331-353.
 - 23) D. Owaki, T. Kano, K. Nagasawa, A. Tero, and A. Ishiguro, *J. Royal Soc. Interface*, **10** (2012), 20120669.
 - 24) D. Owaki, L. Morikawa, and A. Ishiguro, in *Proc. of IROS2012*, 1950-1955.
 - 25) D. Owaki, L. Morikawa, and A. Ishiguro, *Dynamic Walking 2013*, page not shown.
 - 26) D. Owaki and A. Ishiguro, *Sci. Rep.*, **7** (2017) doi:10.1038/s41598-017-00348-9.
 - 27) A. Ruina, J. E. A. Bertram, and M. Srinivasan, *J. Theor. Biol.*, **237**(2) (2007) 208-216.
 - 28) J. E. A. Bertram and A. Gutmann, *J. Royal Soc. Interface*, **6**(35) (2008) 549-559.
 - 29) H. W. Merckens, H. C. Schamhardt, G. J. van Osch, and W. Haetman, *Am. J. Vet. Res.*, **54**(5) (1993) 670-674.
 - 30) L. Maes and A. Abourachid, *J. Exp. Biol.*, **216** (2013) 2257-2265.